



TITLE:

Super-Eddington accretion onto seed black holes in the early Universe(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Takeo, Eishun

CITATION:

Takeo, Eishun. Super-Eddington accretion onto seed black holes in the early Universe. 京都大学, 2020, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22251>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2021-04-01に公開; "Rapid growth of black holes accompanied with hot or warm outflows exposed to anisotropic super-Eddington radiation", E. Takeo, K. Inayoshi, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, and S. Mineshige, 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476, 673, published by Oxford University Press, DOI: 10.1093/mnras/sty264. "Super-Eddington growth of black holes in the early universe: effects of disc radiation spectra", E. Takeo, K. Inayoshi, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, and S. Mineshige, 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 488, 2689, published by Oxford University Press, DOI: 10.1093/mnras/stz1899

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	竹尾 英俊
論文題目	Super-Eddington accretion onto seed black holes in the early Universe (宇宙初期における種ブラックホールへの超臨界降着)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、宇宙初期における種ブラックホールへの急速なガス降着過程を、2次元輻射流体シミュレーションを駆使して調べ、宇宙年齢数億年において太陽質量の10億倍以上に達する巨大質量をもつブラックホール（超大質量ブラックホール）の形成可能条件を示したものである。</p> <p>宇宙初期のガス降着は、ブラックホール天文学分野の最重要課題の一つとされている。観測的には、宇宙年齢8億年において既に超大質量ブラックホールが複数個存在することが知られている。しかしその形成過程は未だ謎に包まれている。一般に宇宙最初の星（質量は100太陽質量程度）や超大質量星（質量は数万～100万太陽質量）などに由来する種ブラックホールがガス降着により巨大化したとされているが、これにはエディントン限界とよばれる古典的限界を超える降着率での急成長が必要である。しかし、このような超臨界降着は、ガス降着に伴う輻射電離加熱により妨げられるという研究もあり、超臨界降着条件の調査が、重要な研究課題となっている。</p> <p>球対称な状況下で、輻射フィードバックを克服し、ボンディ半径と呼ばれるガス降着が始まるとされる半径より外から中へガスを降着させるためには、電離半径がボンディ半径内に収まることが必要とされる。この条件から、水素数密度10万個/ccという平均的な値をもつガス塊では、種ブラックホールは1万太陽質量以上であることが要請される。しかし導出には、様々な理想化や仮定が含まれている。そこで本研究では、(1)非等方な円盤輻射、(2)現実的な円盤スペクトル、(3)アウトフロー効果の3つの観点から、より現実的な超臨界降着条件を新規導出した。</p> <p>申請者はまず非等方輻射の効果について調べた。ブラックホール降着円盤は非球対称的な幾何構造を持つことから、一般に降着流は非等方な輻射場にさらされていると考えるのが自然である。計算の結果、非等方輻射場中では1万太陽質量より十分軽い質量のブラックホールに対しても、超臨界降着が起こることが証明できた。その理由はガス降着流と噴出流とのすみわけにある。極方向に高温アウトフローが噴出する一方、赤道面方向からは中性ガスが輻射にじゃまされずに流入するのである。</p> <p>次に申請者は降着円盤スペクトルの効果を調べた。先行研究においては、ブラックホール近傍からの輻射はべき型スペクトルが仮定されていた。しかし、これは近傍ブラックホールの観測に合わない。また輻射スペクトルはブラックホール質量や降着率に依存するはずである。そこで、10太陽質量から100万太陽質量まで、幅広いブラックホール質量において現実的な降着円盤モデルに基づいて輻射スペクトルを計算し、超臨界降着条件を調査した。その結果、従来の結果より1桁近く、超臨界条件が緩和されること、その効果は小質量のブラックホールほど大きいという結論が得られた。</p>			

最後に申請者はアウトフロー（光速の1割以下の速度をもち、広がった角度に噴き出すガスの流れ）の効果を調べた。輻射効果と並んでアウトフローもブラックホール降着を抑制する機構として重要視されている。そこで輻射場とアウトフローの両方を考慮した超臨界降着条件を調査した。その結果、ガス流は、衝撃波加熱が効いて超高温（100万度）となった回転軸周りのアウトフロー領域と、輻射電離加熱により高温（10万度）となった赤道面の降着領域とに分けられることがわかった。このすみわけにより、アウトフローによっても、超臨界降着条件が緩和されることがわかった。

これら3つの新しい効果を総合した結果、超臨界条件は、従来知られていたものより10倍以上緩和されることがわかった。

(論文審査の結果の要旨)

超大質量ブラックホールの起源は、現代天文学の最重要課題の一つである。同じブラックホールでも、小質量(太陽質量の数倍~数十倍)のものは大質量星の最期の段階で形成されると考えられているが、超大質量ブラックホールの場合はそう単純ではないことが長年の研究でわかっている。大まかにいえば、比較的小質量のブラックホールをつくってからそれらを合体させて大質量にするという説と、1万太陽質量程度の大質量天体をまず作りそれが重力収縮して比較的大質量のブラックホールを形成するという説と、2つの説が提唱され激しい論争を繰り広げている。しかし、前者はなかなか合体しないという困難があり、後者は通常の星をつくらずに大質量天体をどうやって作るのかという点に困難がある。またどちらの場合も、最終的にはガス降着で太らせる必要があることが観測から示唆されている。

本論文は、種ブラックホールの形成過程は問わず、太陽質量の百倍とか1万倍とかの質量をもつ種ブラックホールができたとして、それがガス降着によりどのように成長するかという過程に焦点を絞った研究である。ブラックホールは周囲の物質をいくらかでも吸い込むのではなく、それを律速する要因が二つある。落ち込みつつあるガスが出す電磁波輻射が、あとから落ち込むガスを電離した圧力を及ぼすという効果(輻射フィードバック)と、落ち込みつつあるガスの一部がエネルギーを得て噴出し、あとから落ち込むガスの降着を阻害するという効果(力学的フィードバック)である。観測を説明するには、これらのフィードバックに阻害されることなく、エディントン限界とよばれる古典的限界を超えてガスが降着(超臨界降着)し、ブラックホールが急成長することが必要である。

じつは過去に同じテーマの研究がある。しかし申請者は、従来の研究は(1)球対称な状況下での考察であること、(2)ブラックホール近傍からの輻射スペクトルとして簡単なモデルが用いられていること、(3)力学的フィードバックは考慮されていないことに着目した。そしてこれらの効果をふまえた、ボンディ半径および電離半径をカバーする広い領域での軸対称2次元輻射流体シミュレーションを、ガス密度や中心ブラックホール質量の組み合わせをさまざまに変えて実行し、超臨界降着が起こる条件を調査した。

まず非等方輻射を考慮すると、考慮しない場合に比べ、各段に超臨界降着が起こりやすいことがわかった(第二章)。これは、ガス密度の低い円盤面垂直方向に、選択的に輻射が流れていき、一方でガス降着は、密度が濃いため輻射フィードバックを受けない赤道面から起こるという「すみわけ」の結果である。なお研究の副産物として、極方向に8000度程度の温暖なアウトフローが発生することがわかった。今後、観測面からの検証が待たれる。

次に輻射スペクトルの効果に着目した(第三章)。現実的なスペクトルを考えると、吸収されにくい高エネルギー光子の割合が増えることがポイントである。こうして輻射フィードバックが抑えられた結果、超臨界降着がより起こりやすくなることが定量的に示された。

最後に力学的フィードバック効果を検討した（第四章）。これはアウトフローによりガス降着が抑制されるネガティブフィードバックと、アウトフローの非等方性がガス降着の非等方性を生み出し、上記(1)と同じく「すみわけ」が起きて超臨界降着を助けるというポジティブフィードバックと、どちらが優勢になるかという問題であった。実際にシミュレーションを実行したところ、後者のポジティブフィードバックが優勢となり、超臨界降着が起こりやすくなることが確認できた。

以上、これら新しい効果を総合した結果、超臨界条件は、従来知られていたものより10倍かそれ以上緩和されることがわかった。これは宇宙初期にみつかった超大質量ブラックホール存在の観測と整合的であり、天文学分野の研究における重大な知見であると判断できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、（令和3年3月31日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降